CN 53-1189/**P** **ISSN** 1672-7673

雷达对火星次表层的探测与研究现状*

肖 媛[1,2,3]，苏 彦[1,2]，戴 舜[1,2]，封剑青[1,2]，
丁春雨[1,2,3]，邢树果[1,2,3]，李春来[1,2]

（1. 中国科学院国家天文台，北京 100012；2. 中国科学院月球与深空探测重点实验室，北京 100012；
3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘要：大量火星地貌及表面物质成分的研究表明火星上曾经存在地表水，而目前已探测到的火星上的水广泛存在于极区冰盖和次表层中。近十二年来，欧洲火星快车上搭载的火星次表层和电离层探测先进雷达和美国的火星勘测轨道器上搭载的浅表雷达已经开展了对火星次表层的探测和研究，并取得了一系列科学成果。火星次表层记录着火星形成与演化的重要历史信息。对火星次表层的探测和研究，可以为了解火星的物理特性和构造组成，探寻火星生命，研究火星的地质演化历史提供科学依据。综述目前利用雷达对火星次表层进行的探测和研究，介绍了雷达探测的原理与方法，总结了已取得的科学成果，并展望未来的火星探测雷达。

关键词：火星；次表层；水冰；火星次表层和电离层探测先进雷达(MARSIS)；浅表雷达(SHARAD)

中图分类号：P185.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1672-7673(2017)02-0192-20

火星(Mars)是距离太阳第 4 近的行星，为太阳系内 4 颗类地行星之一[1]。大量火星地貌及表面物质成分的研究表明，火星上曾经存在地表水，而目前已探测到的火星上的水广泛存在于极区冰盖和次表层中。火星次表层为火星壳层表层以下的部分，记录着火星形成与演化的重要历史信息。对火星次表层的探测和研究，可以为了解火星的物理特性和构造组成，探寻火星生命，研究火星的地质演化历史提供科学依据。

17 世纪初，以伽利略为代表的天文学家开始使用望远镜对火星进行观测。在随后的一百多年里，天文学家通过光学天文望远镜对火星进行持续观测，获得了关于火星表面特征的大量认知。1963 年，人类首次使用地基雷达获得了火星表面的回波。此后，该技术一直在大多数火星冲中使用[2]，提供了有关火星表面形貌、反射率、介电常数等物理特性的信息[3]。从 20 世纪 60 年代，人类开始利用航天器对火星展开探测。迄今为止，人类共进行了 43 次火星探测任务，其中美国 21 次，苏联/俄罗斯 19 次，欧洲、日本和印度各 1 次，成功率约为 50%[4]。

在火星探测的过程中，多种探测技术得到了应用，而雷达探测仪在火星探测中具有独特的作用与优势[5]，它发射的电磁波可以穿透火星表面，对火星几米至几千米的次表层结构进行探测，获得火星壳层上部的地质分层信息，了解火星上水的存在与分布情况，为研究火星的地质演化历史和寻找火星生命提供科学依据。雷达探测技术已广泛应用于月球及其他行星的探测，获得了丰富的科学成果[6]。目前，对火星次表层进行探测的雷达有欧洲航天局在 2003 年发射的火星快车(Mars Express)搭载的火星次表层和电离层探测先进雷达(Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding, MARSIS)，美国航天局在 2005 年发射的火星勘测轨道器(Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)搭载的浅表雷达(Shallow Subsurface Radar, SHARAD)。

我国首次火星探测任务已于 2016 年正式立项，计划于 2020 年发射火星探测器，包括轨道器和巡视器，各搭载一台火星次表层探测雷达，因此了解火星雷达探测的原理、探测目标和研究现状尤为重要。

* 基金项目：国家自然科学基金（11173038，41403054）资助.
收稿日期：2016-05-16；修订日期：2016-06-12
作者简介：肖 媛，女，助理研究员. 研究方向：行星雷达探测与反演. Email：xiaoy@nao.cas.cn

1　火星次表层结构

火星表面形貌表明，火星过去曾经存在流动的液体，很可能是水[7]。但由于目前火星上的大气压只有 6 hPa，平均温度 210 K，在表面很难存在液态水。火星全球勘探者(Mars Global Surveyor，MGS)上搭载的火星轨道相机(Mars Orbiter Camera，MOC)揭示了几百米深处的浅次表层结构中可能存在源自被火山物质蚀变产物覆盖的地下冰层中的水[8]。

陨石和小天体的撞击过程在火星壳层的结构演化过程中起重要作用，产生并散布了大量的溅射物。历经火星地质变迁史，撞击产生的溅射物足可以在火星表面覆盖 2 km。文[9]首先给出了火星壳的理想物理剖面，上层为碎裂喷溅物、熔岩流、风化物和沉积物组成的风化层，中部为地质过程如撞击坑作用形成的破裂基底。在一定深度，上覆压力足以大到使物质产生自压实作用。并预测在深度约 2.5 km 处，温度梯度可能达到冰的熔点，碎裂的地下冰层可能容纳液态水。

文[10]根据文[9]的模型将火星次表层结构按照导电性分成了浅次表层和深次表层，得到了一个更加细化的火星次表层结构假想模型，如图 1。火星表面至表面以下 400 m 为浅次表层，主要组成成分为破碎的火山物质蚀变产物(如撞击坑溅射物)、火山熔岩、风化物和沉积物。大部分物质富含铁氧化物，对于雷达波是损耗介质。海盗号两个着陆器(Viking1/2)和火星探路者(Mars Pathfinder)的就位探测数据表明，火星表面覆盖着一层几米厚的(1~10 m)由铁氧化物组成的土壤。从 10 m 到 50 m 为破碎的蚀变玄武岩，从 50 m 到 200 m 为火山熔岩和风化层的混合物，约 200 m 到 400 m 为沉积层。火星表面以下 400 m 至 2.5 km 为深次表层，由地下冰和破碎多孔的火山岩组成的冰冻层，其孔隙和裂缝中充满了冰或液态水。与浅次表层相比，深次表层吸收的雷达波较少，其电特性依赖于冰的热力学稳定性，进而取决于冰的含盐度、地温梯度和岩石孔隙度。约 2.5 km 处可能存在液态水，2.5 km 至 10 km 分布有岩石、水、火山熔岩、大尺寸风化物等。

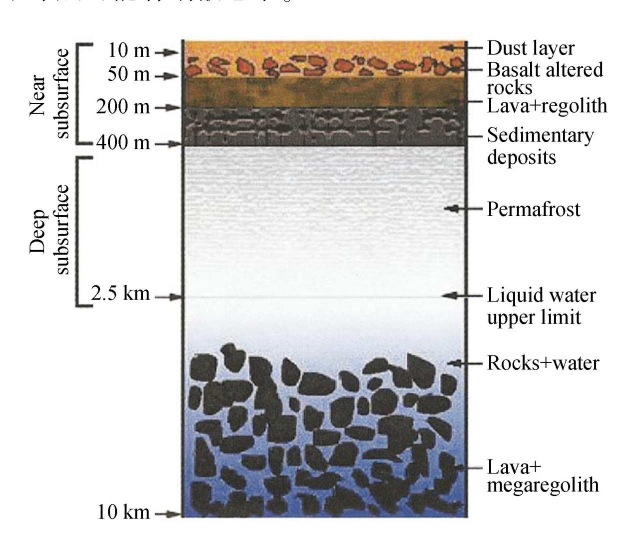


图 1　火星次表层结构假想模型[10]

Fig. 1　The assumed martian subsurface profile[10]

然而火星极区的次表层结构和其他地区非常不同。火星作为类地行星，和地球最相近的地区就是火星极区。火星极区和地球极区一样，覆盖着面积广阔、千米级厚度的水冰，这些水冰和全球气候相互影响，并且冰原地层记录了气候的变化历史。火星北极高原(Planum Boreum，PB)主要由北极残留冰盖(Northern Residual Ice Cap，NRIC)、水冰和灰尘组成的北极层状沉积(North Ploar Layered Deposit，NPLD)和基底单元(Basal Unit，BU)组成。火星南极高原(Planum Australe，PA)主要由南极残留冰盖(Southern Residual Ice Cap，SRIC)、南极层状沉积(South Ploar Layered Deposit，SPLD)和 Argentea 山脊构造(Dorsa Argentea Formation，DAF)这几种地质单元组成[11]。

每一个极区冰盖都由随季节变化的冰盖和永久性的冰盖(极区残留冰盖)组成。如哈勃望远镜观测到北极冰盖在冬季有 CO_2冰层覆盖，直到夏季消失，而在夏季仅可见永久性冰盖。叠加在北极层状沉积之上的北极残留冰盖具有高反照率特征，主要由水冰组成，地势平缓，高分辨率影像显示其表面均匀分布有许多 10~20 m 尺度的凹坑，深度约 1 m，且凹坑底部的颜色和下方北极层状沉积的颜色相近，表明北极残留冰盖的厚度和凹坑的深度一致。南极残留冰盖由高反照率的固态 CO_2组成，厚度为 2~8 m，高分辨率影像显示一种广泛分布的地形，被称为瑞士干酪地形和指纹地形。火星北极高原和南极高原的穹窿绝大部分是由极区层状沉积构成的。北极高原比周围平原高约 3 km，直径约 1 000 km

的冰盖覆盖了北纬 80°以上的区域。北极层状沉积包含厚度超过 2 km 的堆叠混合尘埃的水冰精细分层结构，这些分层结构被认为是在 $10^5 \sim 10^9$ 年内气候变化的结果，体积约为 1.14×10^6 km^3。基底单元处于北极层状沉积下方，尘土的含量更高，推测其形成时期的火星气候与目前火星气候截然不同。南极高原最高处为 3~4 km(−90°~+90°E)，南极层状沉积和北极层状沉积的结构类似。山脊构造围绕着南极层状沉积延伸开来，像相对平坦的平原，上面横跨着蜿蜒的山脊，被认为是古老的极区冰原去除挥发成分后的残余，其体积约为 1.6×10^6 km^3[12]。

2 星载表面穿透雷达的探测原理

电磁波有能力穿透土壤(尤其是电导率较低的干燥土壤)、岩石和冰层，表面穿透雷达利用电磁波的这种能力对类地行星的壳层上部结构进行探测。雷达向火星表面发射电磁波，一部分能量被表面反射，一部分能量则在表层以下的介质中传播，能量的衰减程度与波长和介质的电导率、磁导率等特性有关。电磁波在介电常数不同的介质分界面再次发生反射和透射，使得雷达可以分辨不同的地质分层，如沉积层与基岩层，渗透有水冰的多孔岩石与不含水冰的多孔岩石等。火星次表层雷达探测数据反演得到的最重要的两种参数就是次表层深度(或分层厚度)以及每一层物质的介电常数值。根据次表层深度可以反演研究岩石圈特性、水冰厚度、火星气候及地质演化过程等，由介电常数值可推断该层介质的物理特性，是否存在水冰等重要信息。

星载表面穿透雷达的探测原理如图 2[13]。天线发射的电磁波到达火星表面后发生第 1 次反射，在时间 $t_0=2H/c$ 处雷达接收到一个很强的反射回波，H 为卫星相对火星表面的高度，c 为真空中的光速。另外一部分电磁波透射进入火星壳层，并以相对减小的速度 $v=c/n$ 继续传播(n 为介质的折射率，与介质介电常数实部 ε_r 相关，$n=\sqrt{\varepsilon_r}$)。如果在表面以下深度为 z_0 处存在一个介电常数不连续的次表层，将再次发生电磁波的反射和透射，二次反射回波将穿透第 1 层介质被雷达接收，在时延 t_0+2z_0/v 处产生一个比表面回波弱很多的回波信号。通过对较强表面回波的时域分析，最终可估算表面粗糙度、反射率和平均距离，类似于经典的脉冲限制雷达高度计。此外，通过对二次回波信号的分析可以研究次表层界面，如利用时延可以计算分层界面的深度。

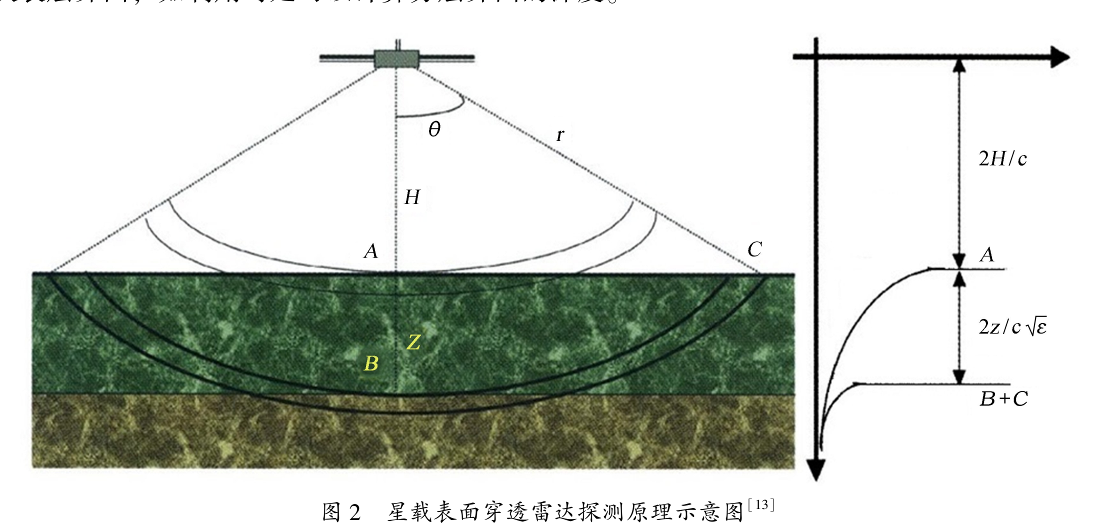


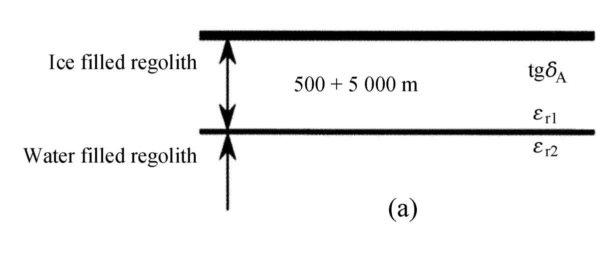
图 2 星载表面穿透雷达探测原理示意图[13]

Fig. 2 Operation principle of the space-based penetrating radar[13]

探测性能受两个主要因素的制约：表面杂波的强度和进入接收机的本底噪声。表面杂波由图 2 中 C 点处的表面区域产生，和图 2 中 B 点处有用的次表层信号具有相同的时延。虽然非常平坦的表面地形不会产生此类问题，但大多数自然的表面地形不是平坦的，且现实情况中的表面杂波信号非常强，导致的直接后果是当次表层回波信号在火星壳层介质传播过程中大大衰减后，表面杂波信号可能覆盖有用信号从而限制了对次表层的探测。此外，即使表面杂波强度低于次表层回波，探测性能还可能被

接收机的本底噪声制约。此类噪声对于常用的低频雷达可能非常高，如宇宙背景噪声比接收机内部噪声高很多量级。

为了评价雷达对次表层界面的探测性能，当运行条件发生变化时，需要对表面和次表层截面共点回波的后向散射截面进行评估。以上两个物理量可以表示为 $\sigma_s = \Gamma_s f_s(\sigma_{h,s}, L_s, \lambda)$ 和 $\sigma_{ss} = \Gamma_{ss} f_{ss}(\sigma_{h,ss}, L_{ss}, \lambda)$，其中 Γ_s 和 Γ_{ss} 为菲涅耳反射率，与表层和次表层的介电特性有关；f_s 和 f_{ss} 是几何散射因子，与表层和次表层的几何结构有关；L_s 和 L_{ss} 是相关长度；λ 为波长。以下以简化的两层火星壳层模型(图 3)为例，分析估算菲涅耳反射率和几何散射因子。



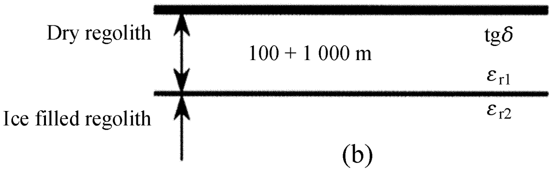


图 3　火星壳层简化模型[13]

Fig. 3　Martian crust stratification models [13]

根据电磁理论，垂直入射的菲涅耳反射率可以表示为

$$\Gamma_s = \left| \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_{r1}(0)}}{1 + \sqrt{\varepsilon_{r1}(0)}} \right|^2 = R_{01}^2, \tag{1}$$

其中，$\varepsilon_{r1}(0)$ 为火星表面的介电常数实部(深度 $z=0$)。深度 z 处的次表层菲涅耳反射率可以表示为

$$\Gamma_{ss,z} = R_{12,z}^2 (1 - R_{01}^2)^2 \, 10^{-0.1\int_0^z \alpha(\zeta)d\zeta}, \tag{2}$$

其中，$R_{12,z}^2$ 为深度 z 处界面的反射系数：

$$R_{12,z}^2 = \left| \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}(z)} - \sqrt{\varepsilon_{r2}(z)}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}(z)} + \sqrt{\varepsilon_{r2}(z)}} \right|^2. \tag{3}$$

$\alpha(\zeta)$ 为电磁波在火星壳层双程传播过程中由于介电损耗引起的衰减(单位 dB/m)：

$$\alpha(\zeta) = 1.8 \times 10^{-7} f_0 \sqrt{\varepsilon} \tan\delta. \tag{4}$$

3　研究现状

3.1　火星次表层和电离层探测先进雷达和浅表层雷达简介

欧洲火星快车搭载的火星次表层和电离层探测先进雷达(图 4a)是一种多波段低频合成孔径下视雷达，装载在火星快车上，主要用于探测火星表面至 5 km 范围内水的分布。火星次表层和电离层探测先进雷达是第 1 种可以探测火星表面以下的仪器，其发出的低频无线电波在到达火星表面时一部分发生反射被雷达接收机接收，绝大部分可以穿透火星表面向下传播，在遇到不同物质层分界面时反射形成第 2 个回波，根据两个回波信号间的时延可得到不同物质层分界面的深度。通过对回波强度的分析还可以反演次表层物质的介电常数等物理特性，进而揭示次表层中水的含量和分布。火星次表层和电离层探测先进雷达有一个很高的相对带宽：1 MHz 带宽可以使真空中的垂直分辨率达到 150 m，相当于次表层中的 50~100 m，取决于电磁波在火星地壳中的传播速度。火星次表层和电离层探测先进雷达发射脉冲的中心频率可以设置为 1.8 MHz、3 MHz、4 MHz 和 5 MHz。在火星向阳面，由于火星电离层等离子体频率截断低于 3 MHz，所以它只工作在 4 MHz 和 5 MHz。在火星背阳面，4 种载波频率都可以使用[14]。

美国火星勘测轨道器搭载的浅表层雷达(图 4b)从 2006 年 10 月开始工作，收集了火星表面和次表层的数据。浅表层雷达可以穿透大约 1 km 的火星次表层结构，主要科学目标是探测火星极区冰盖的内部结构，寻找火星全球地下冰层、岩石层可能存在的液态水。其中心频率为 20 MHz，带宽为 10 MHz。真空中的垂直分辨率可达 15 m，在次表层中可达 10~20 m。20 MHz 的载波频率保证了浅表层雷达在火星昼夜两面都可以工作[15]。

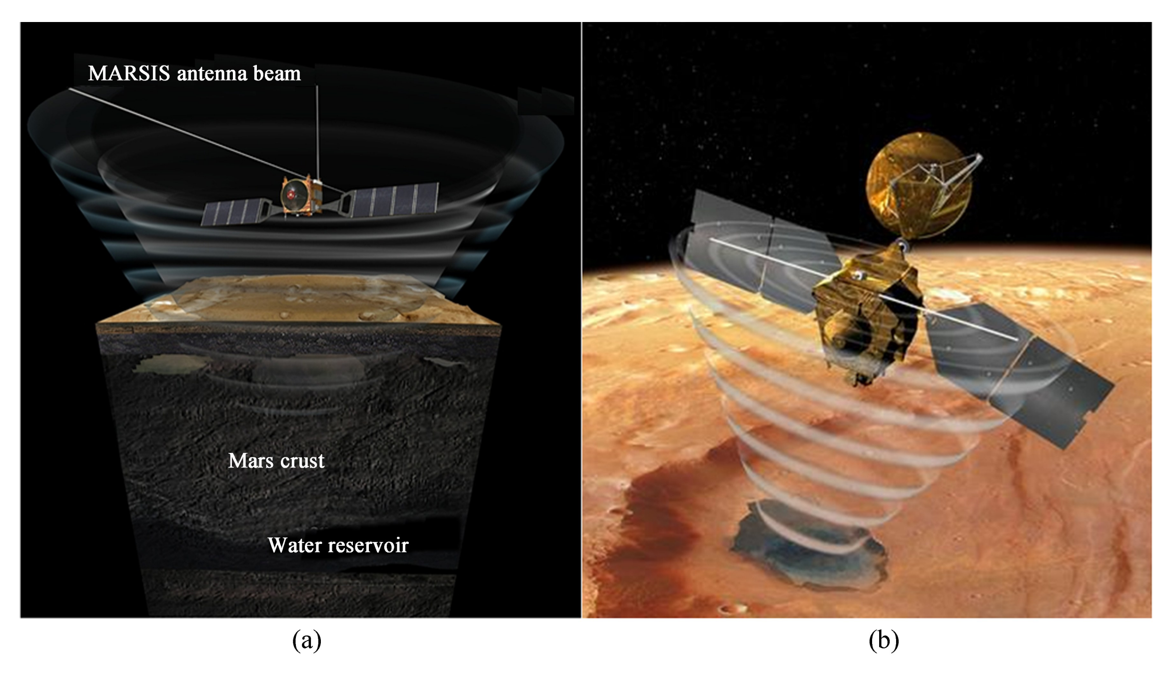


图 4 火星次表层和电离层探测先进雷达 (a) 和浅表层雷达 (b) 的探测过程示意图

Fig. 4 Illustration of the detection process of (a) MARSIS and (b) SHARAD

火星次表层和电离层探测先进雷达和浅表层雷达都应用了综合孔径的原理，达到一个良好的沿轨迹分辨率。火星次表层和电离层探测先进雷达是一个最佳沿轨迹分辨率为 5 km 的非聚焦合成孔径雷达；浅表层雷达的数据可以用聚焦算法(线性调频算法)处理，把水平分辨率提高到了 300 m。目前，火星次表层和电离层探测先进雷达探测了火星次表层 200~3 700 m 深度范围内的结构，而浅表层雷达探测了火星次表层 20~2 700 m 深度范围内的结构。火星次表层和电离层探测先进雷达具有更好的深度穿透性能，浅表层雷达具有更高的垂直分辨率，它们的数据互为补充，展现了真实的火星次表层结构[16]。表 1 列出了火星次表层和电离层探测先进雷达和浅表层雷达的主要参数。

表 1 火星次表层和电离层探测先进雷达和浅表层雷达的主要参数[14-16]

Table 1 Main parameters of MARSIS and SHARAD[14-16]

	MARSIS	SHARAD
频率范围	1. 3~2. 3 MHz, 2. 5~3. 5 MHz, 3. 5~4. 5 MHz, 4. 5~5. 5 MHz	15~25 MHz
偶极子天线长度	40 m tip to tip	10 m tip to tip
单极天线长度	7 m	
带宽	1 MHz	10 MHz
穿透深度	0. 5~5 km	0. 1~1 km
相对介电常数为 4 时的垂直分辨率	75 m	7. 5 m
水平分辨率(顺轨 × 交轨)	5~10 km × 10~30 km	0. 3~1 km × 3~6 km

3. 2 火星极区水冰的探测

研究火星极区的内部结构，有助于研究火星的水文历史、动态特性、气候变化和岩石圈。对于以上科学目标来说，雷达探测是最适合的一种探测技术。研究人员利用火星次表层和电离层探测先进雷达和浅表层雷达在火星极区获得的探测数据进行了全面而细致的研究。

3. 2. 1 北极高原 (Planum Boreum, PB)

火星次表层和电离层探测先进雷达探测了北极高原的内部结构，勾勒出了基底层，探测到北极层

状沉积存在冰冻沉积物，形成于和目前火星的气候非常不同的某一纪元。北极层状沉积所含的水冰总量可被估算[16]。

文[17]利用火星次表层和电离层探测先进雷达早期 3 MHz 和 5 MHz 的探测数据发现，当星下点轨迹从北部平原进入北极层状沉积区域时，北极层状沉积 10°~30°E、海拔 800~900 km 处存在两条强反射信号(图 5)。较低的反射信号一直延续至轨道的末端，此处相对表面回波的时延为 21 μs。通过基于火星轨道激光高度计(Mars Obiter Laser Altimeter，MOLA)数据建立的表面地形回波高保真度的模型证明了这两个反射回波不是仅由表面地形引起的，第 2 个反射回波是由次表层的分层界面引起的。下方次表层的回波时延和相对回波强度表明其上覆盖的物质和纯净水冰的介电常数与损耗角正切相似。假设上层物质是纯水冰，取介电常数为 3，依此对雷达影像图进行偏移处理，将纵坐标的时延转换为深度之后，可以得到次表层反射面和北部平原的海拔近似相等。而北极层状沉积下方的次表层界面没有向下弯曲，证明存在一个非常厚的弹性岩石圈和一个较低的壳幔温度梯度。

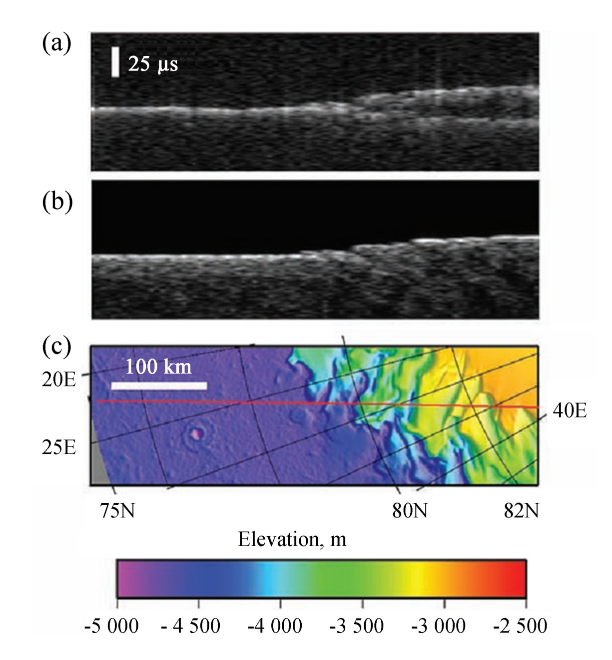


图 5　(a)MARSIS 第 1855 轨与北极层状沉积的边缘相交的雷达影像；(b)假设只有表面回波时仿真生成的雷达影像；(c)沿星下点轨迹方向(红线)的火星轨道激光高度计地形数据[17]

Fig. 5　(a) MARSIS data in radargram format for orbit 1855 as it crossed the margin of the NPLD; (b) Simulated MARSIS data if echoes are only from the surface (nadir and off-nadir clutter); (c) MOLA topography along the ground track (red line)[17]

文[18]利用浅表层雷达的数据分析了北极层状沉积的内部分层结构。雷达反射回波显示了一个连续的沉积层，它具有 4 组被细微隔开的部分，而间隔物是接近纯冰的均匀物质(图 6)。这种分层结构可能由火星倾角或轨道偏心率近百万年的周期性变化造成。观测到的冰负载下方基底最大约 100 m 的挠曲意味着目前平衡弹性岩石圈的厚度大于 300 km。或者说，负载响应可能处于地幔黏性控制的一个过渡状态。两种情况可能都需要火星有大量的具有产热元素的亚球粒陨石。

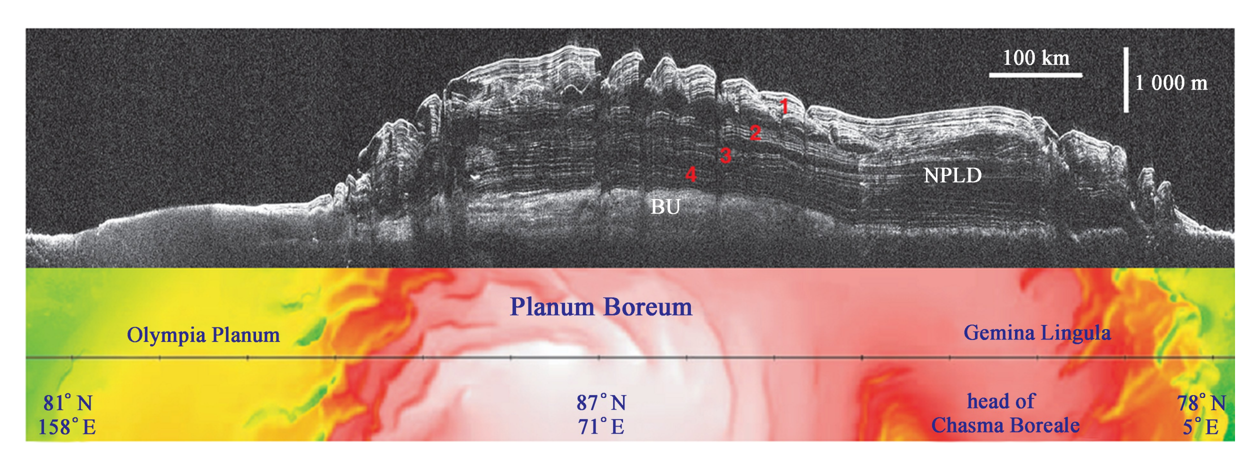


图 6　(上图)浅表层雷达在第 5192 轨获取的火星北极的沉积层和基底单元的雷达图像；(下图)源自火星轨道激光高度计数据的同一地区的数字高程模型，高程差从−4.5(绿色)到−2 km(白色)[18]

Fig. 6　(Top) Radargram from SHARAD orbit 5192. NPLD and the BU are labeled. (Bottom) Ground track of orbit 5192 shown on a digital elevation model (DEM) derived from Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) data. Elevation range is ~−4.5 (green) to −2km (white) [18]

文[19]应用浅表层雷达的探测数据绘制了更多精细的北极高原次表层结构图。覆盖了 1 000 000 km^2的雷达数据揭示了北极层状沉积内部广泛分布有多个反射层。对浅表层雷达图像中的分层结构划分及其边界设定的方法进行了解释，并对雷达图像进行偏移处理，使时延参数转换为深度参数，继而又得到了北极层状沉积内部各单元的立体等厚线图和立体高程图。雷达探测结果证明，数十年来通过研究影像数据和其他来自边缘和沟槽中地层露头的表面数据对北极高原内部结构的推测，提供了更多关于这些结构的详细数据，揭示了它们的很多新特征。雷达还观测到北极层状沉积的底部非常平坦，并且与周围的瓦斯蒂塔斯·伯勒里斯平原(Vastitas Borealis)的裸露表面共面。他们基于探测结果提出了北极层状沉积和火星气候演化历史的假说，指出分层结构的形成是含尘物质变化累积的结果而不是升华过程中的延迟造成的。

文[20]利用火星次表层和电离层探测先进雷达的探测数据反演了火星北极高原的内部结构。更精准地估算出北极高原、北极层状沉积和基底单元中水冰的体积分别为$(1.3 \pm 0.2) \times 10^6$ km^3、$(7.8 \pm 1.2) \times 10^5$ km^3 和$(4.5 \pm 1.0) \times 10^5$ km^3。火星次表层和电离层探测先进雷达还探测出了奥林匹亚平原下方基底单元的横向范围，比之前的影像和地形数据更加精确，并且为文[19]用浅表层雷达数据获得的北极层状沉积的体积和范围提供了独立的证据支持。

3.2.2 南极高原(Planum Australe, PA)

和北极相类似，南极也有一个覆盖了整个南极地区的富含水冰的冰盖，包含 3 个主要结构单元，南极残留冰盖(Southern Residual Ice Cap, SRIC)、南极层状沉积(South Polar Layered Deposits, SPLD)和阿詹泰山脊构造(Dorsa Argentea Formation, DAF)。南极残留冰盖是由高反照率的固态 CO_2 组成的，厚约几米[11]。火星次表层和电离层探测先进雷达对南极层状沉积进行了全面而详细的探测，文[21]根据火星次表层和电离层探测先进雷达的探测数据得到了南极层状沉积厚度和范围的分布(图 7)。南极层状沉积的最大厚度为 3.7 ± 0.4 km，体积约为$(1.6 \pm 0.2) \times 10^6$ km^3。假设南极层状沉积的组成接近纯水冰，则总量相当于 11 ± 1.4 m 的水覆盖整个火星，在之前文[22]用火星轨道激光高度计数据估算的结果范围内。图 8 为火星次表层和电离层探测先进雷达探测到的南极层状沉积内部结构的典型图像，显示了当探测器飞跃南极层状沉积边缘时，表面回波分离成两个连续的界面回波。表面迹线与火星轨道激光高度计获得的地形数据相吻合，而较低的次表层界面为富含水冰的南极层状沉积与其下面基岩的分界面。与北极层状沉积相似，较强的次表层回波表明，电磁波在南极层状沉积内部物质中衰减得很少。因此推断南极层状沉积的大部分组成物质是相当纯净的水冰，覆盖在典型的火星风化层和岩壳之上。在一定区域范围内，基岩界面相对平缓，没有发现区域性下挠，反映了南极地区的岩石圈非常厚(大于 150 km)，同北极地区类似。此外，文[23]还发现在南极层状沉积边缘以外约 1 000 km 的范围内，地下 600~900 m 深处存在次表层界面。表明了 DAF 的组成物质和周围的地质单元显著不同，可能含有水冰。

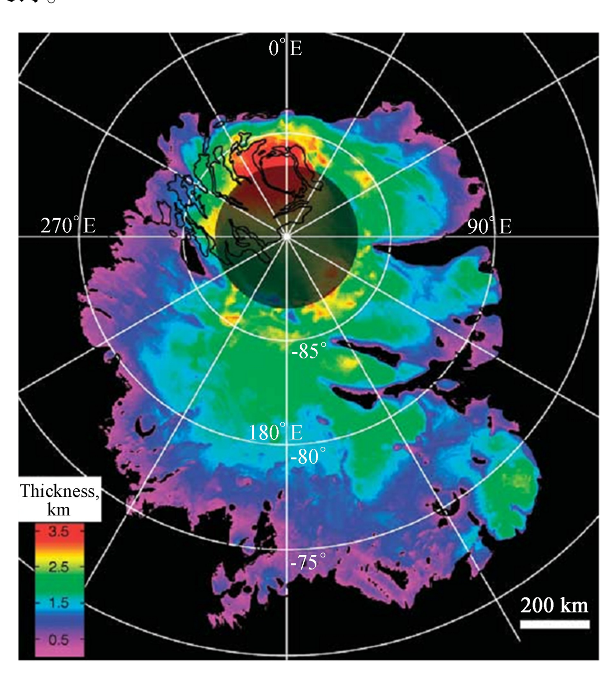


图 7 基于火星次表层和电离层探测先进雷达和火星轨道激光高度计数据的南极层状沉积厚度分布[21]

Fig. 7 Map of the SPLD thickness, based on MARSIS measurements and MOLA surface topography [21]

由于火星次表层和电离层探测先进雷达在真空中的垂直分辨率为 150 m，南极层状沉积的内部单层结构厚度约为几米，因此火星次表层和电离层探测先进雷达不适合研究南极层状沉积的内部分层结构，而浅表层雷达的精度可以满足研究需求。文[24]利用浅表层雷达数据研究了南极层状沉积内部结构，绘制了普罗米修斯舌状高原(Promethei Lingula)区域的次表层地层图。

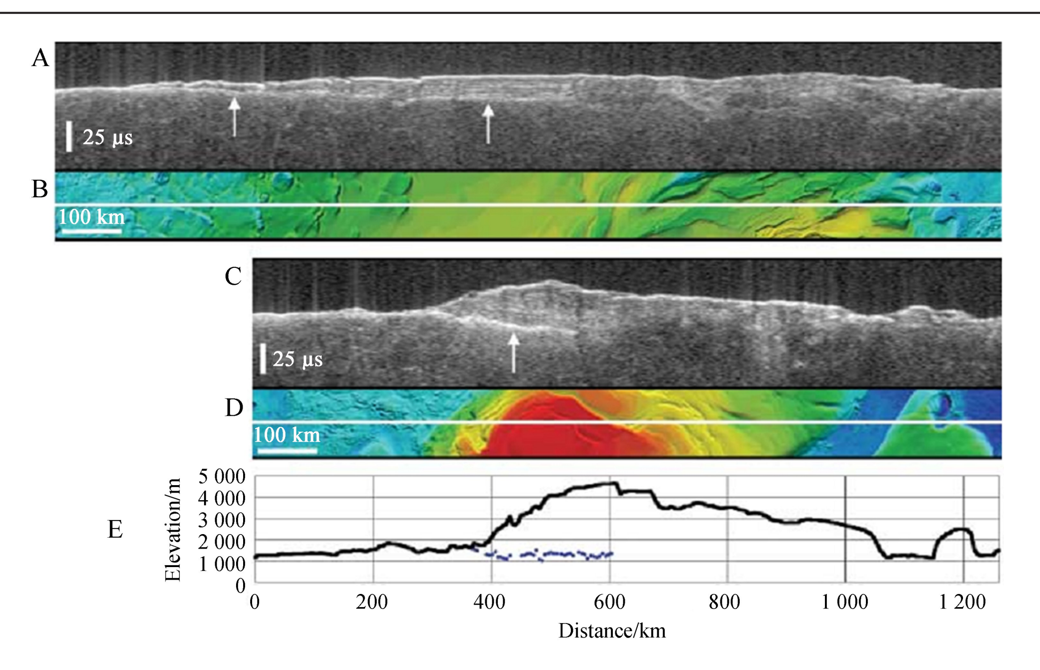


图 8　火星次表层和电离层探测先进雷达发现的南极层状沉积的典型结构[21]

Fig. 8　MARSIS data showing typical features of the SPLD[21]

文[25]融合火星次表层和电离层探测先进雷达的数据、火星全球勘探者获得的重力场数据和火星轨道激光高度计的数据，计算了南极层状沉积的密度约为 1 220 kg/m^3，和含有 15%灰尘的水冰密度一致。结果证实了南极层状沉积可能由相对纯净的水冰构成，并且修正了火星表面水的总量。

文[26]用火星次表层和电离层探测先进雷达的数据，对来自南极层状沉积基底非常强的次表层回波进行了专门研究，发现了文[21]未提到的其他某些区域的基底回波强于表面回波，关于表面物质特性的现有分析不能解释这种明亮的基底回波。然而假设明亮的次表层回波之上覆盖着 10~100 m 厚的固态 CO_2层，无论有无薄的尘土层，通过建立简单的电磁传输模型都可以复原这种实测结果。仿真结果暗示了火星次表层和电离层探测先进雷达可以用来探测南极层状沉积之上覆盖的固态 CO_2的存在，即使它们被灰尘覆盖。

文[27]用火星次表层和电离层探测先进雷达的数据进一步研究了包括南极峡谷(Chasma Australe)的 DAF 区域，发现雷达分层结构和南极层状沉积下方连续分布的 DAF 有关。普罗米修斯盆地(Prometheus Basin)的地表延伸至南极层状沉积的下方，形成了一个明显的基底界面。并且发现普罗米修斯盆地以下 500 m 可能存在富含水冰的分层。

文[28]用火星次表层和电离层探测先进雷达和浅表层雷达的数据对南极层状沉积的普罗米修斯舌状高原地区的地层进行了研究，发现在此区域，火星次表层和电离层探测先进雷达探测到的回波信号和图像中的层状结构有关，而在高于其十倍探测精度的浅表层雷达数据中，可以看出一个独立的反射信号与图像中的 3~7 层结构一致，从而可以实现普罗米修斯舌状高原区域的层位追踪。并且发现此处的地层并不是水平的，而是呈中心高边缘低的趋势。地层整体上和地形一致，但在某些地方与地表交汇，表明此处在南极层状沉积的演化历史上曾发生过多次重要的侵蚀作用。

文[29]用火星次表层和电离层探测先进雷达的数据研究了南极层状沉积的上部地层，并对表面回波进行仿真，将仿真和真实的回波间的变化率进行关联，可以找到不同地表反射率的区域。他们发现南极残留冰盖是一个反射率极低的区域，因为地表和次表面之间有一薄层电磁穿透率很高的物质。而对此次表层界面最佳的电磁仿真模型是在水冰之上覆盖一层 10 m 厚的 CO_2冰所形成的分界面。南极残留冰盖区域内的反射率变化可以解释为介电特性的变化，也可以解释为上层厚度的变化。表面反射率表明两种不同的单元构成了南极残留冰盖，高反射率的中心单元和周围的低反射率单元。

文[30]用浅表层雷达的数据研究了南极层状沉积的 CO_2冰的含量和演化，估算出其含量为 9 500

至 12 500 m^3，约为之前估计的南极残留冰盖中含量的 30 倍。沉积发生在一个由崩塌和其他内部 CO_2 升华释放形成的地层单元中。如果在高轨道倾角时期，CO_2 释放进入火星大气，会使大气中的 CO_2 总质量增加 80%，从而导致更频繁和更强烈的沙尘暴，并出现更多可以使液态水存留的地区。

3.3 火星其他地区次表层的探测

相较于吸引了大多数研究者目光的火星极区，在火星的其他区域，仅有有限的特定区域的次表层结构被研究。

3.3.1 阿萨巴斯卡谷

位于火星的埃律西昂平原中部的阿萨巴斯卡谷(Athabasca Valles)(5°N,150°E)(图 9)附近存在破碎的筏板状地貌，关于其成因有两种假说，一种是文[31]提出的水流成因，另一种是文[32]支持的火山岩浆流结晶成因。文[33]研究了火星次表层和电离层探测先进雷达在该地区的 5 MHz 带宽的探测数据，利用时域有限差分方法建立了 3 种不同介质的地电模型(图 10)，最上面是一层 50 cm 的火星尘埃，中间分别是几十米的冰冻海洋、冰冻泥流和岩浆岩，最下层是玄武岩基底。不同物质组成的介质具有不同的介电特性，介电常数值取自实验室环境下的模拟火星物质。通过比较火星次表层和电离层探测先进雷达接收到的散射信号和仿真结果，得到阿萨巴斯卡谷地区的浅次表层介质更接近于火山物质的结论，从而证实了文[32]的假说。

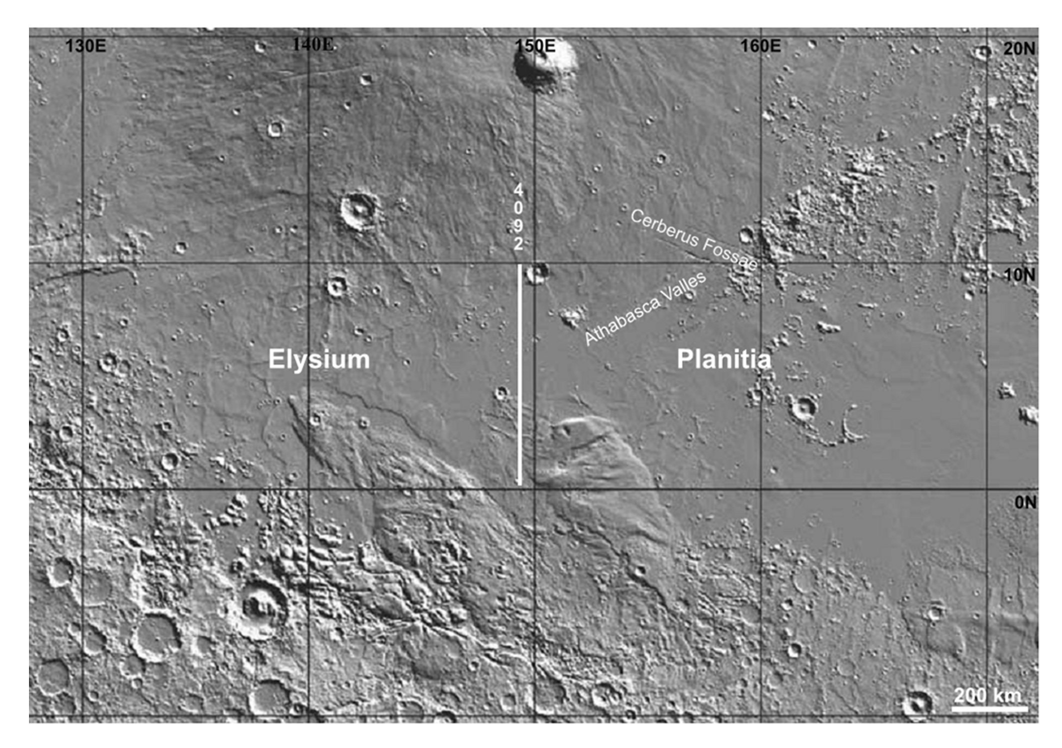


图 9 埃律西昂平原中的阿萨巴斯卡谷研究区域地貌图[33]

Fig. 9 Context map of the Athabasca study area within Central Elysium Planitia[33]

3.3.2 梅杜莎槽沟构造

梅杜莎槽沟构造(Medusae Fossae Formation, MFF)覆盖了赤道附近东经 140°和 240°之间 2.1×10^6 km^2的区域，文[34]通过火星次表层和电离层探测先进雷达数据得到了梅杜莎槽沟构造地区的沉积厚度和介电特性。火星次表层和电离层探测先进雷达探测到了梅杜莎槽沟构造沉积物质与下方地形构造之间的分层界面。梅杜莎槽沟构造表面和次表层界面的回波时延表明，梅杜莎槽沟构造沉积物质与大量普通低地平原沉积物质的介电常数实部相一致，约为 2.9 ± 0.4。介电常数实部值和估算出的介电损耗暗示大量水冰的存在，然而也不能排除低密度贫水物质的存在。如果梅杜莎槽沟构造地区富含水冰，则其中所含的沙尘比例要高于极区沉积层，而其含水量则和南极层状沉积的含水量相当。

文[35]分析了浅表层雷达对梅杜莎槽沟构造的探测数据，认为其介电常数实部值约为 3，在由火星次表层和电离层探测先进雷达数据推断出的梅杜莎槽沟构造较厚部分的介电常数范围内。浅表层雷达数据不能唯一确定梅杜莎槽沟构造的物质组成，但较低的介电常数意味着梅杜莎槽沟构造上层几百米的物质具有高孔隙度。一种可能是梅杜莎槽沟构造由低密度的熔结或连锁的火山碎屑沉积构成，可以维持侧面陡峭的山脊。浅表层雷达在梅杜莎槽沟构造地区的表面回波强度和火星其他典型平原不同，且在梅杜莎槽沟构造东部的某些部分完全消失，就像雷达波被完全吸收的隐形区域一样。这些区域在厘米级至米级有非常高的粗糙度，而表面回波的消失可能是表面粗糙度和低近地表介电常数的双重结果。浅表层雷达也没有在梅杜莎槽沟构造区域探测到内部分层结构。附近区域的红外或可见光波段的图像中可以看出几十米范围的分层，而如果他们的介电常数差异很小或分层不连续，则这些分层界面可能不会被浅表层雷达探测到。缺乏密集的分层界面回波表明了梅杜莎槽沟构造和极区层状沉积很不同。

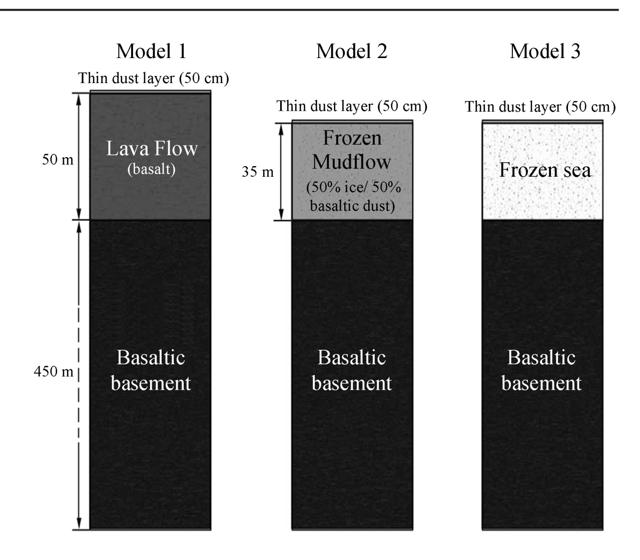


图 10　根据 3 种不同介质建立的分层模型[33]

Fig. 10　Schematic cross sections of the Athabasca geoelectrical models with different media layers[33]

3.3.3　科柏洛斯沼

文[36]对科柏洛斯沼(Cerberus Palus)的浅表层雷达数据进行了详细研究。科柏洛斯沼位于 144.5°E~152.5°E，1°N~8.9°N。图 11 清晰地显示了左边科柏洛斯沼(CP)和右边泽费里亚高原(Zephyria Planum，ZP)下面的次表层的界面。图 12 是研究区域的典型雷达图像，红虚线标出的是科柏洛斯沼区域次表层的延迟补偿，方框标出的是衰减值被估算出来的不同深度地区，左边标示的是 *A*、*B* 两个地质单元。表 2 是反演得到的介电常数等参数值。

结果表明，浅表层雷达探测到的分层结构的预期组成物质是水冰和岩石。在浅表层雷达的频率范围内，水冰的相对介电常数约为 3.1。岩石的相对介电常数介于 4 和 10 之间，高孔隙度(下端)或高金属含量(上端)会引起异常值。文[37]发现影响干燥岩石相对介电常数的主要因素是孔隙度，金属氧化物的含量也起重要作用，但不易定量分析。由此可知，反演得到的介电常数值并不能确定岩石的成分，但可以得出较明确的孔隙度，也能推断孔隙中的第二物质，如水冰。

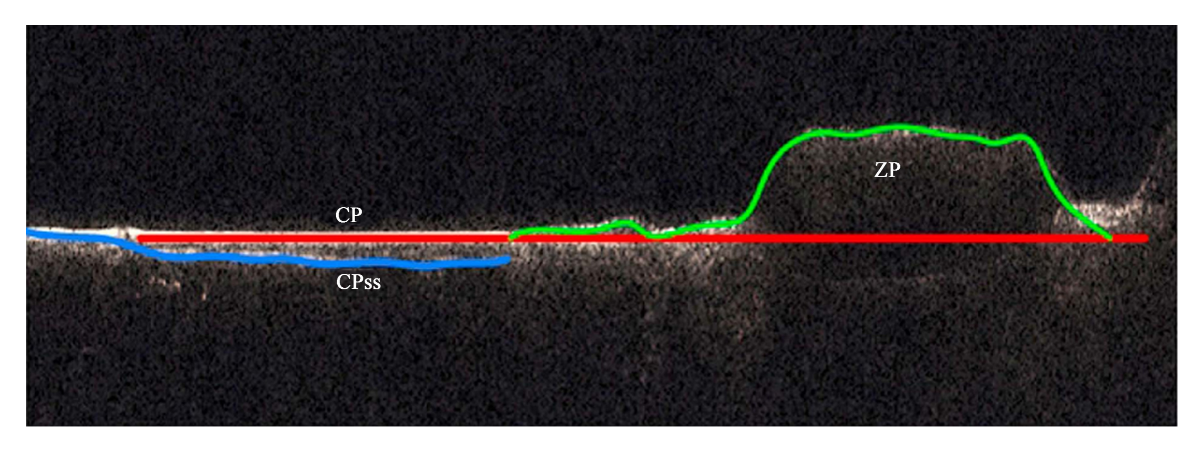


图 11　研究区域的典型雷达图像，显示出表层和次表层的界面[36]

Fig. 11　Typical radargram of the area under study with a schematic indication of considered surface and subsurface interfaces[36]

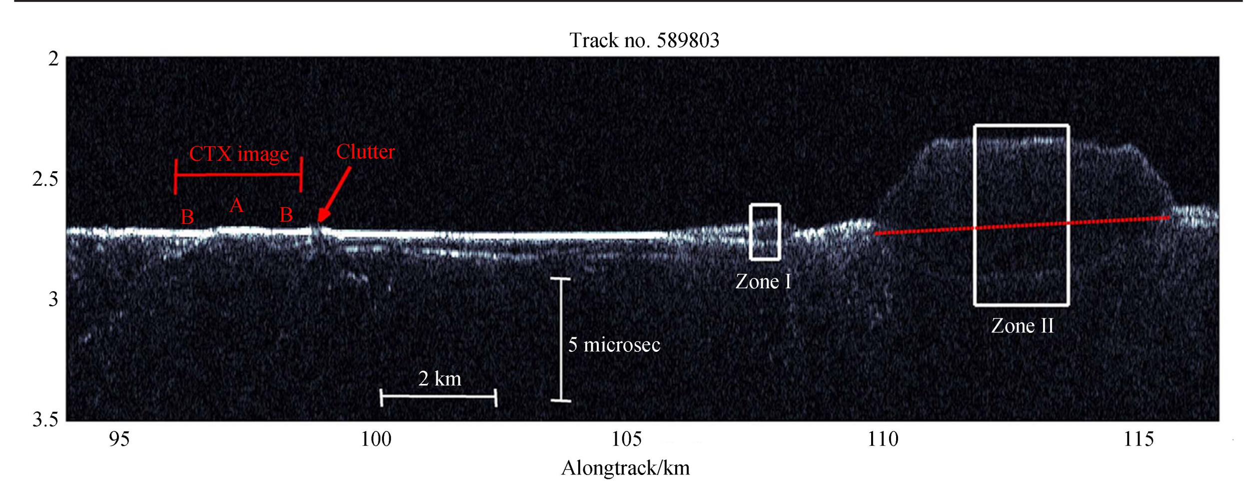


图 12 研究区域的典型雷达图像[36]

Fig. 12 Typical radargram image of the area under study[36]

表 2 反演结果[36]

Table 2 Summary of Inversion Results[36]

Area	Relative Dielectric Constant, (ε)	Attenuation α and tan δ	Geometric Factor Ratio (G_s/G_{ss})
ZP	$\varepsilon=3\pm0.5$	$\alpha=3.2e^{-3}\pm5.3e^{-5}(1\sigma)$ $\tan\delta=8.7e^{-3}\pm1.5e^{-4}(1\sigma)$	$G_{ZP}/G_{CP}=0.024$ $G_{CP}/G_{CP_{ss}}=4.453$
CP	$\varepsilon=3.8\pm0.02(1\sigma)$ $\varepsilon=3.6$–4.0 for $\pm3\sigma$ variation of fitting parameter C of equation (12) and 25% of relative variation of geometric factor ratio	$\alpha=1.1e^{-2}\pm1.3e^{-3}(1\sigma)$ $\tan\delta=2.7e^{-2}\pm3.0e^{-3}(1\sigma)$	
CP_{ss}	$\varepsilon=10.1\pm0.19(1\sigma)$ $\varepsilon=8.4$–12.3 for $\pm3\sigma$ variation of fitting parameter C of equation (12) and 25% of relative variation of geometric factor ratio		

文[33]和文[38]都研究了火星次表层和电离层探测先进雷达在科柏洛斯沼区域的探测数据。文[33]比较了火星次表层和电离层探测先进雷达表面回波和次表层结构模型回波衰减，认为这个盘状地形是火山发源地。尽管没有确切描述介电常数值，但推断此处的介电常数实部值高于含水冰的土壤。文[38]用仿真方法校准了火星次表层和电离层探测先进雷达的表面回波，以确定真实的回波强度和给定介电常数值输出的模拟回波强度。尽管此处区域接近他们研究区域的边缘，但他们估算的介电常数实部值为 6~7，和文[33]的结果相符。

3.3.4 阿波里那山

文[39]利用浅表层雷达的数据分析了阿波里那山(Apollinaris Mons，中心为 174.4°E，9.3°S)附近的冲积扇结构(Fan Deposit，FD)。在最薄的部分雷达图像显示多重不同的次表层界面，表明其内部存在分层的复杂结构(图 13)。估算的冲积扇结构体介电常数实部介于 3 和 5 之间，和冰-硅酸盐混合物或火山碎屑的介电常数相同。因此，推断冲积扇最有可能的形成机制是火山泥流或火山碎屑流。

3.3.5 北部低地被掩埋的盆地

文[40]利用火星次表层和电离层探测先进雷达的数据发现了火星北部低地埋藏在平坦地形之下的巨大的撞击盆地(图 14)，直径从 130 km 到 470 km 不等。由于火星北半球的撞击坑数量远远少于南半球，之前的研究认为北半球的壳层年龄要比南半球更年轻。而火星次表层和电离层探测先进雷达已探测到北半球的直径大于 200 km 的盆地的数量表明，北部的火星壳层年龄至少和南部高地已暴露的壳层一样古老。证明了在火星的地质演化过程中火星壳二分形成于较早时期。

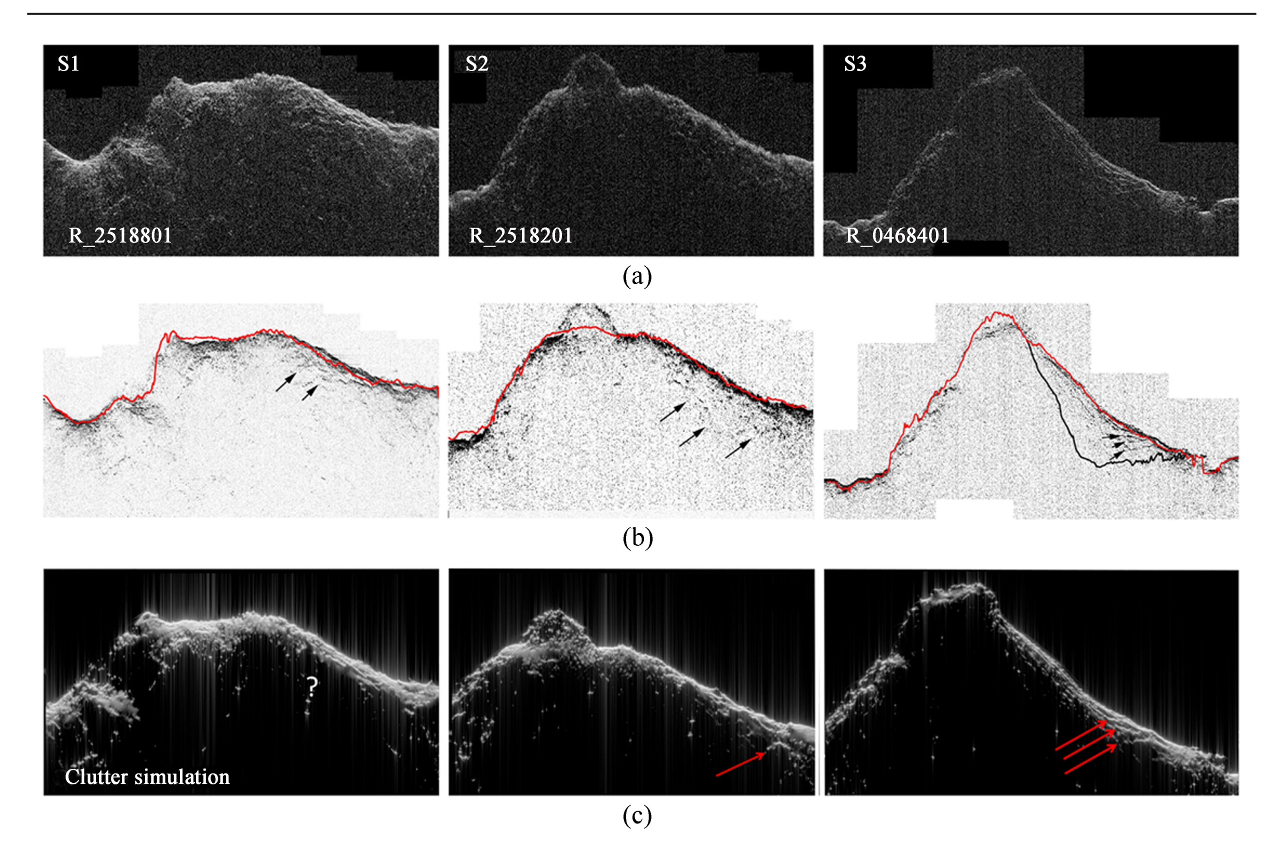


图 13　(a) 浅表层雷达观测到的三轨雷达图像；(b) 红线标出了来自 MOLA 数据的地形轮廓，箭头所指的是可能的次表层界面，雷达图像进行了反转处理以增强对比度；(c) 根据以上三次观测所做的仿真，标出的部分证明为真实的次表层界面[39]

Fig. 13　(a) The radargrams of the three SHARAD observations; (b) Same radargrams with MOLA elevation profiles along the tracks (red) and arrows pointing to possible subsurface reflections. The radargrams have been inverted and their contrast enhanced to increase visibility; (c) Clutter simulations corresponding to the three observations. Note the lack of subsurface reflections that are visible in the upper and middle panels, which suggests that these are genuine subsurface interfaces[39]

3.3.6　南部中纬度地区被掩埋的冰川

文[41]利用浅表层雷达的数据发现了火星南部中纬度地区存在掩埋的冰川(Buried Glaciers)。浅表层雷达探测了 Hellas 撞击坑东缘山丘附近的几个舌状岩屑坡(Lobate Debris Aprons, LDA)的内部。如图 15，图 15(a)为用单程传播时间模拟的表面回波；图 15(b)为真实的雷达影像图，垂直箭头标出了和表面回波不一致的回波，在相邻轨道的数据中也被证实存在，因此这些回波被认为是次表层回波；图 15(c)为假设次表层成分为水冰，对图像进行偏移处理后得到的雷达影像图。雷达信号的衰减较弱，且雷达波速近似于在水冰中的波速，这同火星次表层和电离层探测先进雷达在极区层状沉积结构中的发现相似，表明舌状岩屑坡的内部有水冰存在，进而推断被岩石碎屑掩埋的古老冰川的存在。

文[42]用浅表层雷达的数据分析了火星上的撞击坑基座。直径大于 30 km 的含有水冰和硅酸盐，体介电常数介于 3 和 5 之间。而浅表层雷达对小撞击坑的探测更难一些，因为反射回波被杂波叠加覆盖。探测到的几个小撞击坑的基座下存在次表层反射，介电常数约为 6。

3.4　火星全球介电常数的反演及水的分布估计

文[43]利用火星次表层和电离层探测先进雷达的数据制作了第 1 幅火星全球 3~5 MHz 表面雷达回波图，表面回波的强度变化主要由千米级的表面粗糙度引起。并且利用从火星轨道激光高度计地形图得到的火星次表层和电离层探测先进雷达模拟信号对表面回波功率图标准化，推导出了浅层介电常数。最终得到了火星地表以下几十米的介电特性表示图。图 16 展示了火星次表层和电离层探测先进雷达获得的火星表面介电常数分布和由中子光谱反演的水的分布。

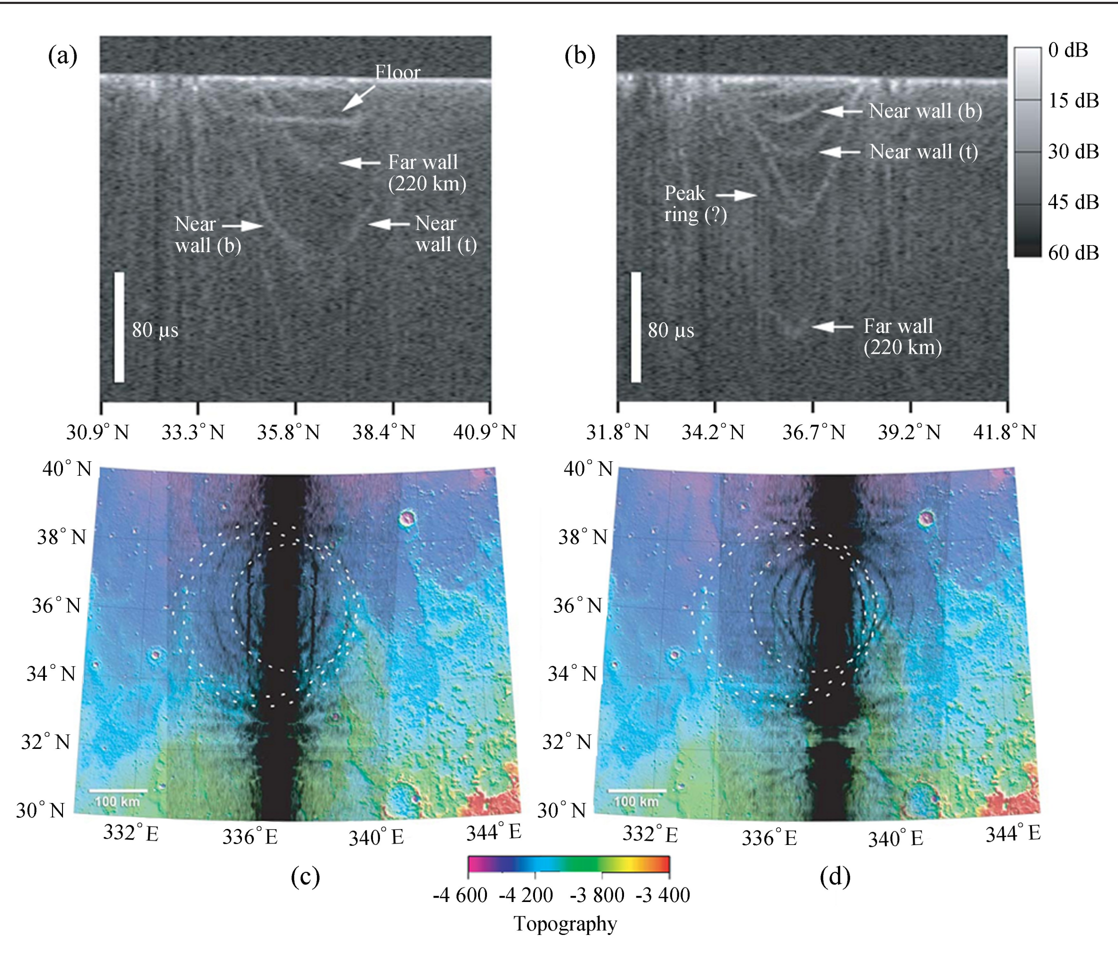


图 14 火星次表层和电离层探测先进雷达在克里斯平原(Chryse Planitia)的雷达图像和地面范围预测[40]

Fig. 14 Radargrams and ground-range projections of MARSIS data in Chryse Planitia[40]

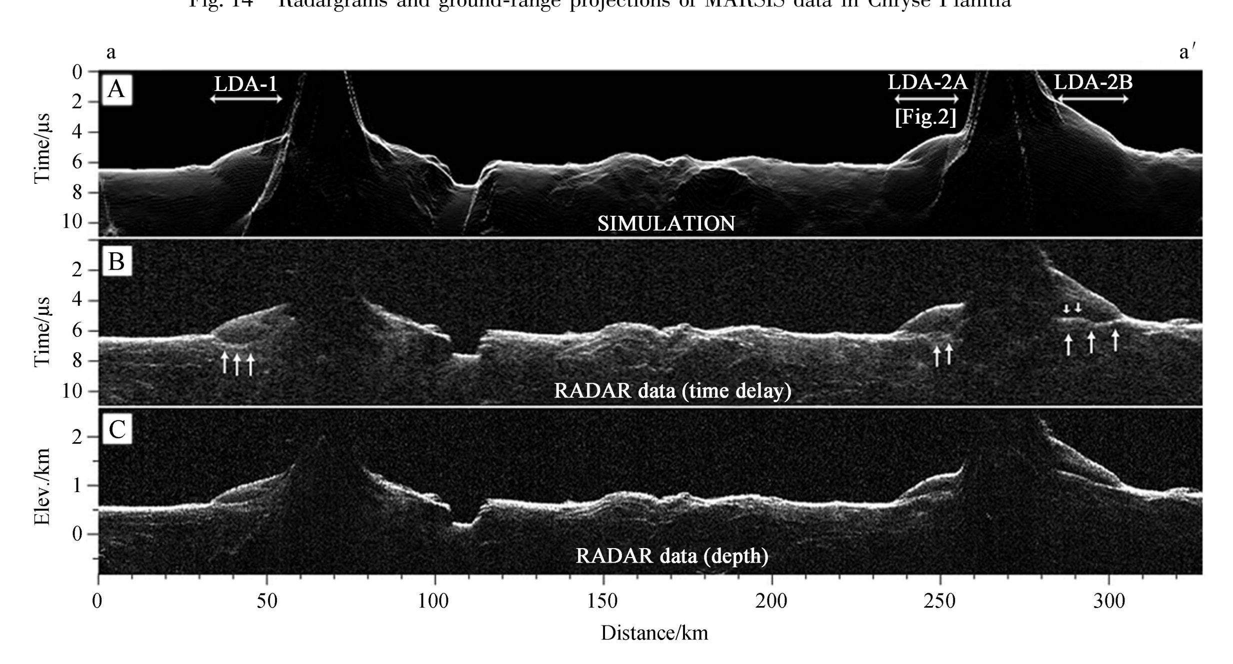


图 15 浅表层雷达第 6830 轨的雷达影像图。(a) 用单程传播时间模拟的表面回波; (b) 真实的雷达影像图，箭头指示产生次表层回波的位置; (c) 假设是水冰成分进行偏移处理后的雷达影像图[41]

Fig. 15 Results for SHARAD orbit 6830. (a) Simulated surface echoes (clutter) in one-way travel time. (b) SHARAD data in one-way travel time. Vertical arrows identify echoes from the subsurface; (c) Radar data converted to depth assuming a water-ice composition[41]

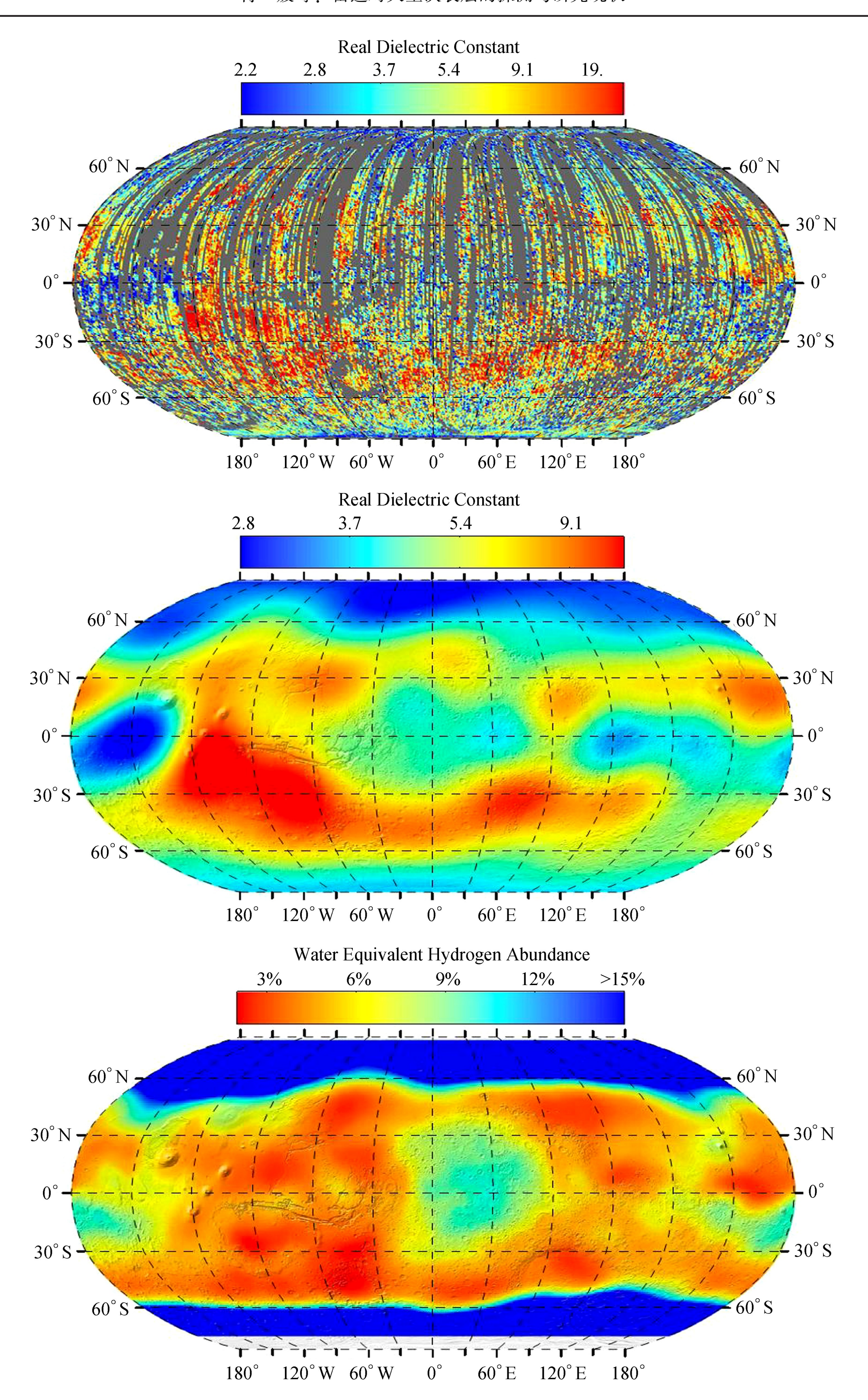


图 16　(a) 火星次表层和电离层探测先进雷达得到的介电常数分布图；(b) 对上图进行 8 阶球谐函数全球插值得到的介电常数分布图；(c) 利用 Mars Odyssey 上的 γ 射线光谱仪(GRS)探测到的火星全球 1 m 厚度风化层中氢的含量所得到的水当量(重量百分比)分布图[43-44]

Fig. 16　(a) MARSIS dielectric map; (b) Global interpolation of the dielectric map (top) using eight-order spherical harmonics adjustment; (c) Global map of hydrogen concentration in the top meter of the regolith obtained by the neutrons spectrometer of the GRS/Mars Odyssey instruments suite. Concentration is expressed as water equivalent hydrogen abundance in weight percent[43-44]

结果显示，介电常数随纬度变化，在中纬度带具有高值(20~40°)，而在赤道和高纬度地区具有较低值(图 17)。通过比对火星次表层和电离层探测先进雷达回波反射图和伽马射线光谱仪(Gamma Ray Spectrometer，GRS)的观测结果[44]，可以得出结论：观测的从 50~60°纬度向着极区的方向反射率减小与表面风化物中水冰的含量开始增加相符合。假设在火星次表层和电离层探测先进雷达的分辨像元范围内，火星次表层物质的组成和质地是均匀的，可推测地下水冰含量为 $10^6 km^3$，相当于一个极区冰盖的水冰含量。在赤道地区也发现了低反射率区域，雷达数据和伽马射线光谱仪对氢分布的研究结果表明，赤道地区的低介电常数值也可能与水有关。北部高纬度地区的反射率普遍比南部高纬度地区低，除了阿尔巴环形山(Alba Patera)地区。而南极地区的反射率低与 CO_2 冰薄层有关。

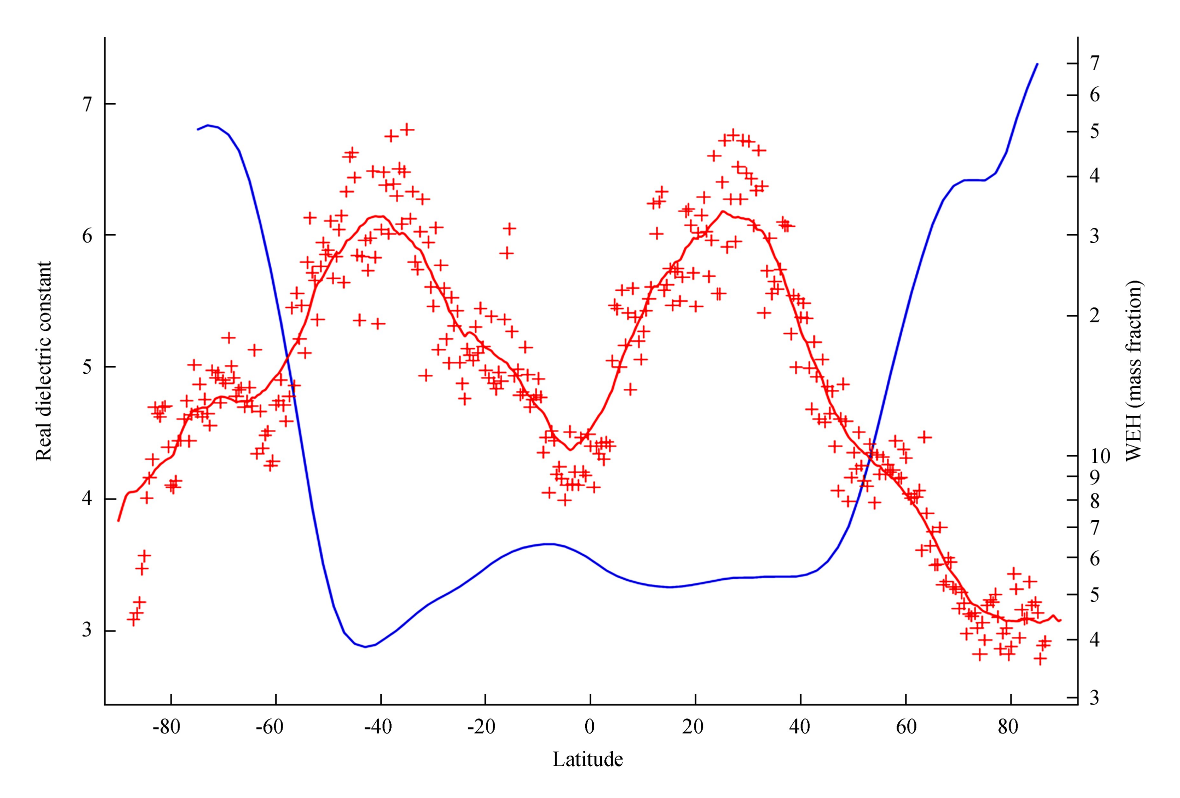


图 17 火星次表层和电离层探测先进雷达得到的表面介电常数实部随纬度的变化(红线及十字)和伽马射线光谱仪获得的水当量随纬度的变化(蓝线)[43]

Fig. 17 Longitudinal averages of MARSIS surface real dielectric constant (red curve and red crosses) and GRS neutrons spectrometer WEH concentration (blue curve)[43]

两个参数控制着层状介质的介电常数：物质成分(化学的、矿物的、含水量和物理状态)和物质的密度。因为水冰呈现较低的介电常数值(典型值为 3.1)，而岩浆岩的介电常数相对较高(典型值 8)。层状介质中存在的大量水冰将导致表面反射率相对于干燥、密实的岩石层较低。而低密度的介质也可以导致这种有效介电常数较小，因此使用互补的数据集对完善的解释至关重要。

4 总结和展望

雷达可以探测火星的次表层结构，还可以探测分层结构的物质与分布情况，在火星壳层水的探测方面有重要的应用前景，为未来人类登陆火星的选址提供依据，并为研究火星的地质和气候演化历史提供重要的科学依据。

火星极区由于覆盖有广阔而深厚的冰盖，一直以来是雷达探测的热点目标。科研人员根据雷达的探测数据证实了火星极区存在大量的水冰，估算了水冰和干冰的厚度和体积，并对极区冰盖内部的特征结构进行了详细研究，从而为火星气候及地质演化解译提供了科学依据。

对于火星的其他区域，仅有有限的特定区域的次表层结构被研究。关于是否探测到了地下水并无确切结论。某些区域根据雷达探测数据反演得到的介电常数值和水冰的介电常数值一致或接近，但并不能排除高孔隙度的贫水物质，不能唯一确定水的存在。鉴于雷达探测还未实现对火星的全球覆盖，探测仍在继续，对火星地下水的寻找仍然是雷达探测的首要目标。未来可考虑采用极化雷达对火星水冰进行探测，极化雷达对冻结挥发物非常敏感，与反演介电常数的方法配合，可以解决在火星水冰探测方面存在的不确定问题。同时，为了支持理论上的雷达数据解译，研究更加精确、有效的雷达数据反演方法也非常重要。

4.1　国外的火星探测雷达计划

未来欧洲空间局将与俄罗斯合作发射地外生物探测器(Exobiology on Mars，ExoMars)，包括 4 个探测器，其中 1 个轨道器，2 个固定式着陆器，1 个火星车，分别于 2016 年和 2020 年各用 1 枚俄罗斯质子号火箭发射。火星车上装载有探地雷达(Water Ice and Subsurface Deposit Information On Mars，WISDOM)，将用来探测火星次表层结构，以帮助选择适合的地层进行取样分析。该系统由两个固定在车体后半部上方的小型维瓦尔第天线(Vivaldi-antenna)组成。科学家通过分析电磁波反射状况可以建立次表层可能的地层图并选定地表下 2 至 3 m 的探测目标，以配合钻孔深度最深可达 2 m 的钻孔机。探测资料将与全景摄影机数据和收集的样本分析资料整合以辅助支持钻孔探测。

美国将于 2020 年发射火星 2020(Mars 2020)火星车，其上搭载了一台火星次表层实验成像仪(The Radar Imager for Mars' Subsurface Experiment，RIMFAX)。由挪威负责研制的火星次表层实验成像仪(图 18)也是一台探地雷达，随着火星车前进它可以扫描火星地表以下 530 m 深度的结构特性，分辨率达到厘米级。结合火星次表层和电离层探测先进雷达和浅表层雷达的数据，不仅可以获得区域性的火星浅表层地质结构特征，还可以获得全球性的火星浅层地质结构。对研究火星土壤、沉积岩层的形成和演化具有重要意义。此外，火星次表层实验成像仪将有助于火星 2020 任务探测火星环境的潜在宜居性，并选择一组最有价值的岩石(或土壤)作为未来返回地球的样品[45]。

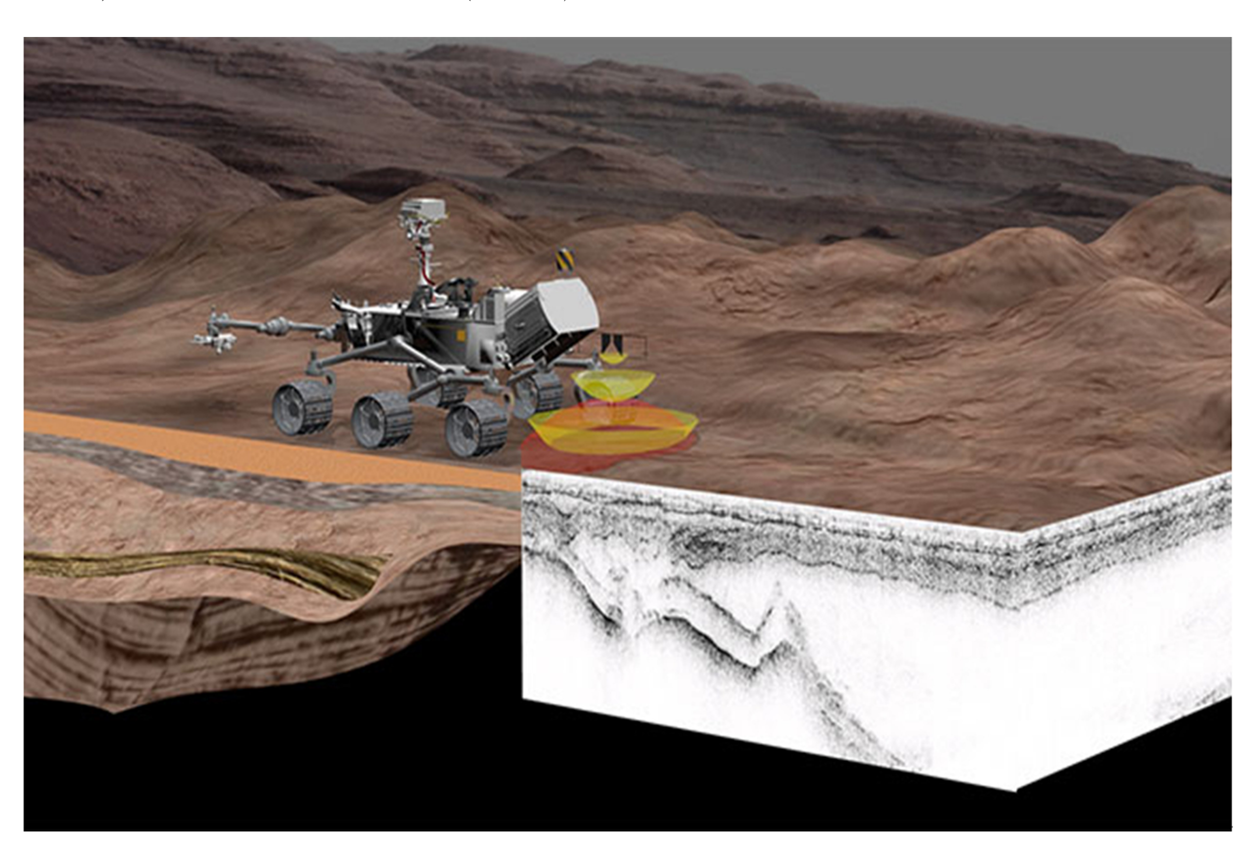


图 18　RIMFAX 探测火星次表层结构工作示意图[45]

Fig. 18　Illustration of RIMFAX probing Martian subsurface[45]

4.2 我国未来的火星探测雷达

我国也将于 2020 年发射火星探测器，包括轨道器和巡视器，各搭载一台火星次表层探测雷达，为深入研究火星土壤层、沉积层和冰层等地质结构提供科学数据。轨道器上搭载的雷达主要用于大范围地进行火星次表层地质结构探测，雷达波对冰层的穿透能力为千米量级，对冰层厚度的分辨率为米级，通过双频、双极化、不同分辨率的回波数据，可以确定水冰是否存在，并对水冰的厚度和含量分布进行评估与分析。同时它还可以根据火星表面反射的双频、双极化雷达回波数据，构建火星全球电离层电子总浓度分布图。此外轨道器雷达在地火转移轨道或火星环绕轨道开展行星际甚低频射电频谱探测，获取行星际甚低频射电频谱数据。巡视器雷达用于对巡视区表层和次表层结构进行高精度探测，通过火星地表和次表层超宽带全极化回波数据，确定巡视区土壤、次表层厚度及其分层结构，获取火星次表层地质结构高分辨率剖面图，并确定是否存在水冰。巡视器雷达对火星土壤的探测深度大于 10 m，层厚分辨率为厘米量级；对次表层及冰层的探测深度大于 100 m，深度分辨率为米级。此外，它还可以获取火星局部地区电离层不均匀体的雷达图像和电子浓度分布，为深入研究火星电离层的物理特性提供科学依据。

综合分析和比较国内外的火星探测目标，未来的火星探测雷达更趋于星地结合的精确化、综合化设计。欧美已经利用火星次表层和电离层探测先进雷达和浅表层雷达这两个星载雷达获取了关于火星表面、次表层及电离层的大量宏观数据，因此下一步选择采用巡视器搭载探地雷达对火星次表层进行精细探测，探测结果可以和星载雷达的探测数据综合利用。而我国面临的是首次火星探测，要在欧美已经获得丰富探测成果的背景下继续新的探索，既是机遇又是挑战。挑战在于火星探测充满危险与艰辛，50 多年来，世界各国向火星发射的各类探测器约一半以失败告终，我国的首次火星探测亦面临很多技术方法的攻坚克难与验证工作，而轨道器次表层探测雷达是首次作为有效载荷搭载在我国的行星探测器上，即将接受新的考验。机遇在于尽管人类在火星探测方面已经有了丰富的成果和重大进展，但是到目前为止有关火星的主要问题和基本问题仍没有明确的答案，还需要进一步的探索来回答这些未知问题[4]。我国选择采用轨道器雷达和巡视器雷达联合工作，两个雷达除分别接收自己的回波信号外，巡视器雷达还可以获取轨道器雷达信号在火星次表层地质结构中的回波数据，这是一种颇具想象力和创新性的设计理念，且双极化雷达对冻结挥发物非常敏感，在火星水冰、干冰的探测方面具有国外的火星探测雷达无可比拟的优势。我国已于 2014 年 12 月成功发射了嫦娥三号(CE-3)月球探测器，玉兔号巡视器搭载的测月雷达也在月面成功实施了月球次表层的探测，虽然后来因巡视器的机械故障只获得了有限的探测数据，但测月雷达的表现非常优秀[46]，这也使我们对未来的火星次表层雷达充满信心。总之，我国的火星探测雷达可以对火星次表层结构、火星水冰及火星电离层进行全球大范围和局部精细化相结合的探测，其探测成果将帮助我们更好地了解火星上水的作用历史及火星的形成与演化。

参考文献：

[1] 焦维新，邹鸿. 行星科学 [M]. 北京：北京大学出版社，2009：143-146.

[2] Simpson R A，Harmon J K，Zisk S H，et al. Radar determination of Mars surface properties [M]. Tucson：The University of Arizona Press，1992：652-685.

[3] Barlow N G. 火星：关于其内部、表面和大气的引论 [M]. 吴季，赵华，译. 北京：科学出版社，2010：61-62.

[4] 侯建文，张晓岚，王燕，等. 火星探测征程 [M]. 北京：中国宇航出版，2013：90-121.

[5] 金亚秋，法文哲，徐丰. 火星探测的微波遥感技术 [J]. 空间科学学报，2008，28(3)：264-272.

Jin Yaqiu，Fa Wenzhe，Xu Feng. Overview of the advance for Mars exploration using microwave remote sensing [J]. Chinese Journal of Space Science，2008，28(3)：264-272.

[6] 丁春雨，封剑青，郑磊，等. 雷达探测技术在探月中的应用 [J]. 天文研究与技术，2015，12(2)：228-242.
Ding Chunyu，Feng Jianqing，Zheng Lei，et al. A review of applications of radar-detection techniques in lunar explorations [J]. Astronomical Research and Technology，2015，12(2)：228-242.

[7] Malin M C，Edgett K S. Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars [J]. Science，2000，288(5475)：2330-2335.

[8] Malin M C，Edgett K S. Sedimentary rocks of early Mars [J]. Science，2000，290(5478)：1927-1937.

[9] Clifford S M. A model for the hydrologic and climatic behavior of water on Mars [J]. Journal of Geophysical Research，Planets，1993，98(E6)：10973-11016.

[10] Heggy E，Paillou P，Ruffie G，et al. On water detection in the Martian subsurface using sounding radar [J]. Icarus，2001，154(2)：244-257.

[11] Byrne S. The polar deposits of Mars [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences，2009，37(1)：535-560.

[12] Orosei R，Jordan R L，Morgan D D，et al. Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding (MARSIS) after nine years of operation：a summary [J]. Planetary and Space Science，2015，112：98-114.

[13] Picardi G，Biccari D，Seu R，et al. MARSIS：Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding [M]. Netherlands：ESA Publications Division，2004：51-69.

[14] Jordan R，Picardi G，Plaut J，et al. The Mars express MARSIS sounder instrument [J]. Planetary and Space Science，2009，57(14-15)：1975-1986.

[15] Seu R，Phillips R J，Biccar D，et al. SHARAD sounding radar on the Mars Reconnaissance Orbiter [J]. Journal of Geophysical Research Planets，2007，112(E5)：37-55.

[16] Plaut J J. A decade of radar sounding at Mars [C] // Eighth International Conference on Mars. 2014，1791：1464.

[17] Picardi G，Plaut J J，Biccari D，et al. Radar soundings of the subsurface of Mars [J]. Science，2005，310(5756)：1925-1928.

[18] Phillips R J，Zuber M T，Smrekar S E，et al. Mars north polar deposits：stratigraphy，age，and geodynamical response [J]. Science，2008，320(5880)：1182-1185.

[19] Putzig N E，Phillips R J，Campbell B A，et al. Subsurface structure of Planum Boreum from Mars Reconnaissance Orbiter Shallow Radar Soundings [J]. Icarus，2009，204(2)：443-467.

[20] Selvans M M，Plaut J J，Aharonson O，et al. Internal structure of Planum Boreum，from Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding data [J]. Journal of Geophysical Research Planets，2010，115(E9)：5424-5425.

[21] Plaut J J，Picardi G，Safaeinili A，et al. Subsurface radar sounding of the south polar layered deposits of Mars [J]. Science，2007，316(5821)：92-95.

[22] Smith D E，Zuber M T，Frey H V，et al. Mars Orbiter Laser Altimeter：experiment summary after the first year of global mapping of Mars [J]. Journal of Geophysical Research Planets，2001，106(E10)：23689-23772.

[23] Plaut J J，Ivanov A，Safaeinili A，et al. Radar sounding of subsurface layers in the south polar plains of Mars：correlation with the dorsa argentea formation [C] // Lunar and Planetary Science Conference. 2007，38：2144.

[24] Seu R，Phillips R J，Alberti G，et al. Accumulation and erosion of Mars' south polar layered deposits

[J]. Science, 2007, 317(5845): 1715-1718.

[25] Zuber M T, Phillips R J, Andrewshanna J C, et al. Density of Mars' south polar layered deposits [J]. Science, 2007, 317(5845): 1718-1719.

[26] Cartacci M, Frigeri A, Orosei R, et al. Surface and subsurface radar backscattering coefficient over the Martian south polar layered deposits from MARSIS data [C] // American Geophysical Union, Fall Meeting. 2008: 1466

[27] Farrell W M, Clifford S M, Milkovich S M, et al. MARSIS subsurface radar investigations of the South Polar reentrant Chasma Australe [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2008, 113(E4): 2217-2235.

[28] Milkovich S M, Plaut J J, Safaeinili A, et al. Stratigraphy of Promethei Lingula, south polar layered deposits, Mars, in radar and imaging data sets [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2009, 114(E3): 1779-1794.

[29] Mouginot J, Kofman W, Safaeinili A, et al. MARSIS surface reflectivity of the south residual cap of Mars [J]. Icarus, 2009, 201(2): 454-459.

[30] Phillips R J, Davis B J, Tanaka K L, et al. Massive CO_2 ice deposits sequestered in the south polar layered deposits of Mars [J]. Science, 2011, 332(6031): 838-841.

[31] Murray J B, Muller J P, Neukum G, et al. Evidence from the Mars Express High Resolution Stereo Camera for a frozen sea close to Mars' equator [J]. Nature, 2005, 434(7031): 352-355.

[32] Jaeger W L, Keszthelyi L P, McEwen A S, et al. Athabasca Valles, Mars: a lava-draped channel system [J]. Science, 2007, 317(5845): 1709-1711.

[33] Boisson J , Heggy E, Clifford S M, et al. Sounding the subsurface of Athabasca Valles using MARSIS radar data: exploring the volcanic and fluvial hypotheses for the origin of the rafted plate terrain [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(E8): E08003.

[34] Watters T R, Campbell B, Carter L, et al. Radar sounding of the Medusae Fossae Formation Mars: equatorial ice or dry, low-density deposits? [J]. Science, 2007, 318(5853): 1125-1128.

[35] Carter L M, Campbell B A, Watters T R, et al. Shallow radar (SHARAD) sounding observations of the Medusae Fossae Formation, Mars [J]. Icarus, 2009, 199(2): 295-302.

[36] Alberti G, Castaldo L, Orosei R, et al. Permittivity estimation over Mars by using SHARAD data: the Cerberus Palus area [J]. Journal of Geophysical Research Atomspheres, 2012, 117 (E9): 371-387.

[37] Rust A C, Russell J K, Knight R J, et al. Dielectric constant as a predictor of porosity in dry volcanic rocks [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1999, 91(1): 79-96.

[38] Mouginot J, Pommerol A, Beck P, et al. Dielectric map of the Martian northern hemisphere and the nature of plain filling materials [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(2): L02202-L02206.

[39] El-Maarry M R, Heggy E, Dohm J M. Radar investigations of Apollinaris Mons on Mars: exploring the origin of the fan deposits [J]. Planetary and Space Science, 2014, 103: 262-272.

[40] Watters T R, Leuschen C J, Plaut J J, et al. MARSIS radar sounder evidence of buried basins in the northern lowlands of Mars [J]. Nature, 2006, 444(7121): 905-908.

[41] Holt J W, Safaeinili A, Plaut J J, et al. Radar sounding evidence for buried glaciers in the southern mid-latitudes of Mars [J]. Science, 2008, 322(5905): 1235-1238.

[42] Nunes D C, Smrekar S E, Fisher B, et al. Shallow Radar (SHARAD), pedestal craters, and the lost Martian layers: initial assessments [J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2011, 116(E4): 119-136.

[43] Mouginot J, Pommerol A, Kofman W, et al. The 3-5 MHz global reflectivity map of Mars by MARSIS/Mars Express: implications for the current inventory of subsurface H_2O [J]. Icarus, 2010, 210(2): 612-625.

[44] Feldman W C, Prettyman T H, Maurice S, et al. Global distribution of near-surface hydrogen on Mars [J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2004, 109(E9): 111-124.

[45] 王琴, 张巧玲. 美国火星探测步入十年黄金期 [J]. 太空探索, 2015(3): 22-25.
Wang Qin, Zhang Qiaoling. The Mas probing of the United States stepts into the golden decade [J]. Space Exploration, 2015(3): 22-25.

[46] Su Yan, Fang Guangyou, Feng Jianqing, et al. Data processing and initial results of Chang'e-3 lunar penetrating radar [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2014, 14(12): 1623-1632.

Overview of the Martian Subsurface Exploration and Research Using Radar

Xiao Yuan[1,2,3], Su Yan[1,2], Dai Shun[1,2], Feng Jianqing[1,2], Ding Chunyu[1,2,3], Xing Shuguo[1,2,3], Li Chunlai[1,2]

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China, Email: xiaoy@nao.cas.cn;
2. Key Laboratory of Lunar and Deep-Space Exploration, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The surface morphology and mineral composition of Mars attest to the past presence of fluid water. Recent research reveals the existence of large amount of water in Mars Polar Caps and subsurface. In the past 12 years, the Martian subsurface has been probed by orbital radar sounders, the Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding (MARSIS) on ESA's Mars Express, and the Shallow Subsurface Radar (SHARAD) on NASA's Mars Reconnaissance Obiter. Both have been successful and obtained a series of scientific achievements. Martian subsurface is believed to have recorded the important massage about the history of Mars. Probing and studying the Martian subsurface could help revealing the formation and revolution of Mars and searching for Martian life. We described the research status about Martian subsurface in this overview, introduced the operation principle of the space-based penetrating radar, and presented the key findings of MARSIS and SHARAD, which have provided a new insight into many aspects of the history and environment of the planet. We also introduced several future Martian subsurface radars in this paper.

Key words: Mars; Subsurface; Water-ice; MARSIS; SHARAD